

УДК 628.31

**ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА СЕДИМЕНТАЦИОННЫЕ И ВОДООТДАЮЩИЕ СВОЙСТВА СУСПЕНЗИЙ АКТИВНОГО ИЛА****И.Э. ГОЛОВНЕВ***(Витебскводоканал);**канд. техн. наук, доц. В.Н. МАРЦУЛЬ**(Белорусский государственный технологический университет, Минск)*

*Представлены результаты исследований влияния ультразвуковой обработки на седиментационные и водоотдающие свойства суспензий активного ила. В качестве объекта исследований рассмотрены суспензия активного ила, а также жидкая и твердая фазы (кек и фугат) обработанной суспензии в ультразвуковых установках с пьезоэлектрическим и гидродинамическим излучателями. Дана оценка эффективности ультразвуковой обработки по изменению дисперсного состава и времени капиллярного впитывания иловых суспензий, а также седиментационных характеристик глинистых суспензий.*

**Ключевые слова:** *суспензия активного ила, седиментационные характеристики, водоотдающие свойства, ультразвуковые установки, эффективность ультразвуковой обработки.*

**Введение.** Очистные сооружения канализации – важнейший элемент инженерной инфраструктуры населенного пункта, от эффективности функционирования которого зависит не только устойчивая работа всех систем жизнеобеспечения, но и состояние водных объектов, в которые сбрасываются сточные воды после очистки. Одной из актуальных проблем, решение которой будет способствовать обеспечению надлежащего состояния водных объектов, является повышение эффективности функционирования очистных сооружений канализации, которые являются основными источниками поступления в водные объекты разнообразных загрязняющих веществ.

Известно большое число разработанных и реализованных на практике технических и технологических решений, которые обеспечивают соблюдение жестких требований по содержанию в очищенных сточных водах загрязняющих веществ, использование осадков. Однако все они требуют значительных капитальных вложений и не всегда применимы в условиях действующих очистных сооружений. В последнее время в технологии очистки сточных вод находит применение ультразвуковая обработка, оказывающая комплексное воздействие на дисперсные системы и растворы различного состава, что позволяет интенсифицировать процессы диспергирования, фазового разделения, химические реакции в жидких средах различного состава [1].

Как следует из анализа практики применения ультразвука в технологии очистки сточных вод [2], ультразвуковая обработка может оказывать комплексное воздействие на суспензию активной биомассы: изменяет дисперсный состав и состав фаз суспензии, воздействует на процессы жизнедеятельности микроорганизмов, разрушая тем самым их клетки.

В зависимости от решаемых задач необходимо выбрать соответствующие условия обработки, которые обеспечивают получение требуемого результата (эффекта). В технологии биологической очистки сточных вод известно применение ультразвуковой обработки в основном для обработки осадков с целью повышения выхода биогаза и интенсификации анаэробного сбраживания [3; 4]. Цель такой обработки состоит в максимальной дезинтеграции биомассы с целью перевода внутриклеточного вещества микроорганизмов в жидкую фазу. Поэтому основным критерием, который используется для оценки эффективности такой обработки, является прирост показателя ХПК (химическое потребление кислорода) жидкой фазы иловой суспензии. При этом хороший эффект достигается за счет использования достаточно мощных источников ультразвука и/или длительной обработки.

При использовании ультразвуковой обработки для интенсификации процессов биологической очистки требуется определить условия ультразвуковой обработки, которые бы влияли на активность биомассы, изменяли состав фаз иловых суспензий в нужном направлении, способствовали более полному разделению фаз в процессах первичного и вторичного отстаивания, но не приводили к потере их жизнеспособности. Известно, что ультразвуковая обработка оказывает влияние на седиментационные и водоотдающие свойства иловых суспензий [5; 6], что может быть использовано для повышения эффективности первичного отстаивания и уменьшения количества избыточного активного ила. Такое влияние обусловлено тем, что при ультразвуковой обработке в жидкую фазу переходят как внеклеточные, так и при определенной интенсивности обработки внутриклеточные полимеры, которые способствуют флокуляции иловых суспензий [7–11].

Однако результаты ранее проведенных исследований трудно сопоставимы по причине использования различных показателей, характеризующих режим ультразвуковой обработки, применения источ-

ников ультразвука с различными частотными характеристиками. Исследователи часто приходят к прямо противоположным выводам в части влияния ультразвуковой обработки на седиментационные и водоотдающие свойства иловых суспензий [6; 12]. Чаще всего предметом исследований является изменение дисперсного состава иловых суспензий, а не их флокулирующие свойства. В то же время использование флокулирующих свойств иловых суспензий позволяет повысить эффективность механической очистки сточных вод без применения коагулянтов и флокулянтов. Известно, что флокулирующими свойствами обладает и необработанная суспензия активного ила. Однако их практическое использование явно недостаточно, так как флокулирующие свойства проявляются при чрезмерно больших расходах.

Учитывая характер действия ультразвуковой обработки на многофазные системы, интерес в плане активации флокулирующих свойств представляет изучение влияния обработки малой интенсивности на иловые суспензии.

Цель исследований – определение условий ультразвуковой обработки иловых суспензий, обеспечивающих улучшение седиментационных и водоотдающих свойств и повышение за счет этого эффективности очистки сточных вод от взвешенных веществ.

В качестве объекта исследований рассматривались иловые суспензии, которые отбирали на Минской очистной станции (МОС) и очистных сооружениях УП «Витебскводоканал» в период 2009–2015 годов. Учитывая, что состав активного ила, как и состав сточных вод, поступающих на очистные сооружения, подвержен определенным изменениям, работу проводили на образцах активного ила, отобранных в различные периоды времени: март – апрель; июнь – июль; сентябрь – октябрь; декабрь – январь.

**Методы исследований.** Ультразвуковую обработку суспензий активного ила проводили на установках, отличающихся типом излучателя.

Ультразвуковую обработку с использованием пьезоэлектрического излучателя проводили на установке производства фирмы «ИНЛАБ» (Россия) ИЛ 100-6/1 (максимальная мощность 630 Вт с возможностью ступенчатого регулирования в диапазоне 315...630 Вт, рабочая частота –  $22 \pm 10\%$  кГц) и установке типа УЗДН-2Т (рабочая частота  $22 \pm 10\%$  кГц).

Ультразвуковую обработку с использованием гидродинамического излучателя проводили на установке циркуляционного типа. Роль гидродинамического излучателя (кавитатора) выполняют два струйных устройства в виде сопла Вентури. Сопротивление кавитатора  $\Delta P = 20$  кПа, насос марки Х50-32-125 (подача –  $12,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ , напор – 20 м).

Для корректного сравнения эффективности двух вариантов ультразвуковой обработки использовали удельный расход энергии ( $E$ , Дж/г) [13]:

- для пьезоэлектрического излучателя

$$E_a = \frac{NT}{V_a C}; \quad (1)$$

- для гидродинамического излучателя

$$E_r = \frac{PBT}{V_r C}, \quad (2)$$

где  $N$  – мощность излучателя, Вт;  $T$  – продолжительность обработки, с;  $V_a$  – объем суспензии, обрабатываемой пьезоэлектрическим излучателем,  $\text{дм}^3$ ;  $C$  – концентрация суспензии,  $\text{г}/\text{дм}^3$ ;  $P$  – гидравлическое сопротивление струйного устройства, Па;  $B$  – объемный расход иловой суспензии,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $V_r$  – объем суспензии, обрабатываемой в установке с гидродинамическим излучателем,  $\text{дм}^3$ .

Для определения уровня интенсивности обработки использовали показатель ультразвуковой мощности ( $\text{Вт}/\text{см}^3$ ), который рассчитывали делением мощности излучателя на объем обрабатываемой суспензии [14].

Для характеристики водоотдающих свойств иловых суспензий использовали такой показатель, как время капиллярного впитывания (ВКВ), определяемый на оригинальном приборе, разработанном в БГТУ [15].

Седиментационный анализ проводили согласно [16] с использованием торзионных весов WT1000 (Польша) с пределом взвешивания 1000 мг. Конструкцию весов доработали с целью проведения взвешивания чашки, помещенной в емкость с суспензией активного ила, расположенную под весами.

Оценивали флокулирующие свойства обработанных иловых суспензий методом пробного коагулирования на модельных сточных водах с содержанием взвешенных веществ (глина) 200, 500 и  $1000 \text{ мг}/\text{дм}^3$  и сточных водах, отобранных после песколовков на очистных сооружениях. Пробное коагулирование проводили на установке Flocculator 2000 (фирма Kemira). Для выбранных расходов иловых суспензий исследовали кинетику осаждения на осадительной колонне высотой 500 и диаметром 50 мм (глубина слоя отстаивания 300 мм). О содержании взвешенных веществ в жидкой фазе судили по показателю мутности,

который определяли на колориметре КФК-2МП при длине волны 540 нм. Разделение обработанных иловых суспензий на кек и фугат проводили центрифугированием в течение 5 минут при 5000 мин<sup>-1</sup>.

**Результаты и обсуждение.** Учитывая особенности состава суспензий активного ила, дисперсная фаза которого представлена как твердыми частицами различного состава, так и простейшими, и бактериями, образующими сложные агрегаты – флоккулы, при оценке дисперсного состава не ставили цель определить истинный размер частиц обработанного активного ила. Изменение дисперсного состава оценивали по кривым седиментации, полученным для необработанной и обработанной ультразвуком иловых суспензий с начальной концентрацией 6,2 г/дм<sup>3</sup> при температуре 20 °С.

С увеличением времени ультразвуковой обработки (энергозатрат на обработку) закономерно изменяется дисперсный состав иловой суспензии в сторону увеличения доли частиц меньших размеров, которые осаждаются в течение более длительного времени. Иловая суспензия становится более однородной.

На рисунке 1 представлены кривые седиментации активного ила в зависимости от времени ультразвуковой обработки (интенсивность обработки 2 Вт/см<sup>3</sup>).

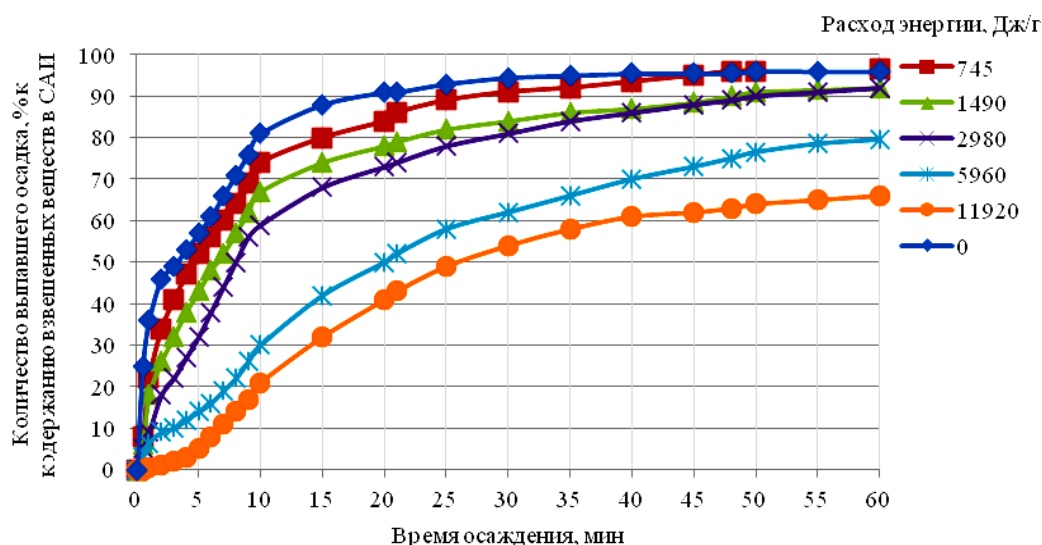


Рисунок 1. – Кривые седиментации обработанной ультразвуком суспензии активного ила

С увеличением времени ультразвуковой обработки (энергозатрат на обработку) закономерно изменяется дисперсный состав иловой суспензии в сторону увеличения доли частиц меньших размеров, которые осаждаются в течение более длительного времени. Иловая суспензия становится более однородной.

На рисунке 2 представлена диаграмма, иллюстрирующая изменение дисперсного состава иловой суспензии в процессе ультразвуковой обработки.

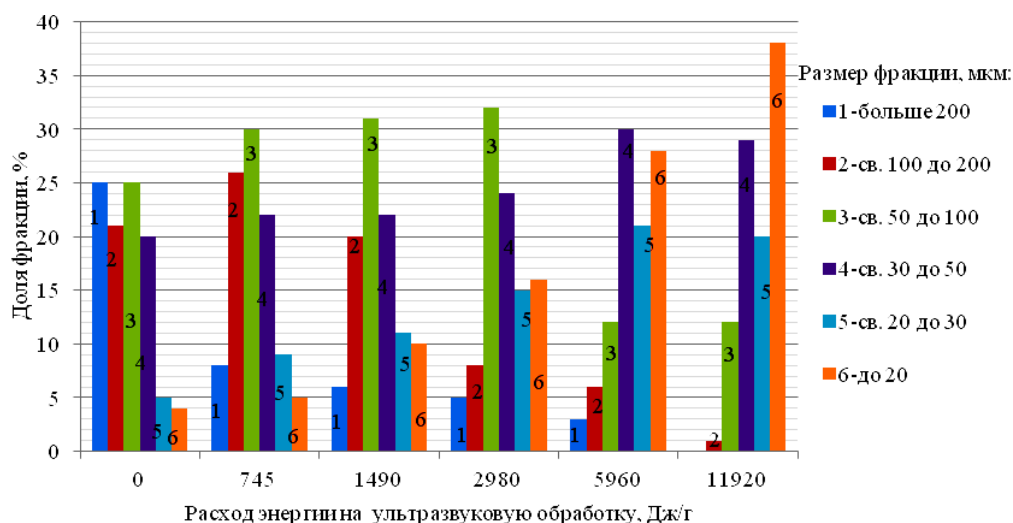


Рисунок 2. – Изменение состава дисперсной фазы активного ила в зависимости от времени ультразвуковой обработки (энергозатрат)

Для построения диаграммы дисперсные частицы, осаждающиеся на чашке торсионных весов, разделены условно на 6 фракций в зависимости от времени осаждения. Размеры фракций  $r$ , соответствующие времени полного осаждения частиц определенных размеров, определяли по уравнению

$$r = (KH/\tau)^{0.5}, \quad K = 9\mu/2g(\rho - \rho_0), \quad (3)$$

где  $H$  – высота столба жидкости (100 мм);  $\mu$  – вязкость жидкости, Па·с;  $\rho - \rho_0$  – разности плотностей твердой и жидкой фаз суспензии, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\tau$  – время осаждения, с.

Для условий поведения седиментационного анализа частицы с размерами свыше 200 мкм осаждаются в течение 0,5 минут; от 200 до 100 мкм – в интервале от 0,5 до 2 мин; от 50 до 100 мкм – в интервале от 2 до 8 мин; от 30 до 50 мкм – в интервале от 8 до 21 мин; от 20 до 30 мкм – в интервале от 21 до 48 мин; менее 20 мкм – свыше 48 мин. Так как иловая суспензия характеризуется достаточно высокой концентрацией дисперсной фазы, частицы суспензии при осаждении взаимодействуют друг с другом, а скорость их осаждения изменяется. Это значит, что условие, при котором выполняется закон Стокса и возможно определение дисперсного состава суспензии по результатам седиментационного анализа, не выполняется. Кроме этого, вероятно, имеет место вторичная флокуляция частиц дисперсной фазы иловой суспензии с участием внеклеточных полимеров, выделяющихся в водную фазу в процессе ультразвуковой обработки. Поэтому приведенные выше значения являются ориентировочными, но позволяют оценить изменение дисперсного состава.

Показатель ВКВ характеризует способность суспензий отдавать (удерживать) воду и используется для оценки способности к обезвоживанию наряду с показателем удельного сопротивления осадка. В отличие от показателя ВКВ, удельное сопротивление осадка характеризует водоотдающую способность непосредственно после обработки суспензии (осадка), что позволяет избежать вторичной флокуляции, которая может оказывать влияние на результаты определения.

Исследования проводились на иловой суспензии (6,2 г/дм<sup>3</sup>), обработанной на установках с пьезометрическим и гидродинамическим излучателями. Результаты исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Зависимость показателя ВКВ от энергозатрат на ультразвуковую обработку суспензии активного ила

Объект исследования	Энергозатраты, Дж/г	ВКВ, с
Исходный активный ил	0	293
Активный ил, обработанный на установке с гидродинамическим излучателем	347	270
	694	285
	1735	386
	3470	400
	5205	449
Активный ил, обработанный на установке с пьезометрическим излучателем	745	269
	1490	288
	2980	356
	5960	405
	11920	450

Чем ниже показатель ВКВ, тем лучше иловая суспензия отдает воду. Следовательно, ультразвуковая обработка малой интенсивности при низких энергозатратах способствует выделению в жидкую фазу внеклеточных полимеров, которые способствуют формированию новой структуры хлопьев активного ила, характеризующихся лучшими водоотдающими свойствами. Причем минимальное значение ВКВ при обработке иловой суспензии на установке с гидродинамическим излучателем достигается при меньших энергозатратах в сравнении с пьезоэлектрическим излучателем.

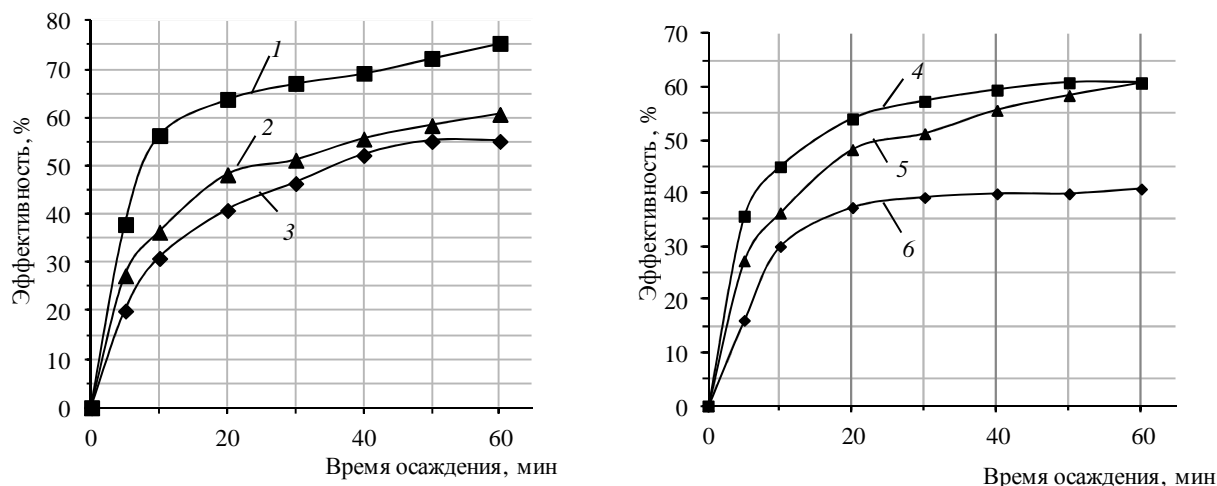
Повторение эксперимента на иловой суспензии концентрацией 9,2 г/дм<sup>3</sup> не подтвердило положительное влияние ультразвуковой обработки на показатель ВКВ. В то же время обработка иловых суспензий в диапазоне концентраций 5...7 г/дм<sup>3</sup> показала, что при энергозатратах в диапазоне 700...1500 Дж/г в зависимости от типа излучателя достигается уменьшение показателя ВКВ.

Таким образом, при использовании ультразвуковой обработки низкой эффективности следует ожидать повышения флокулирующих свойств суспензии активного ила, что может найти применение при механической очистке сточных вод для повышения эффективности.

Для оценки флокулирующих свойств проводили пробное коагулирование глинистых суспензий с концентрацией 200, 500 и 1000 мг/дм<sup>3</sup>. Оценку флокулирующих свойств проводили для суспензии активного ила (САИ), подвергнутой ультразвуковой обработке, а также для фугата и кека, полученных путем разделения обработанной суспензии центрифугированием. Доза составляла 1...3% об. (определили по результатам пробного коагулирования для расходов в диапазоне 1...10% об.). Дальнейшее увеличение дозы не приводит к интенсификации осаждения частиц суспензии в результате того, что увеличивается количество взвешенных веществ, поступающих с САИ, и эффект флокуляции не компенсирует его.

В глинистую суспензию добавляли САИ, фугат или кек, смесь отстаивали и через определенные промежутки времени контролировали содержание взвешенных веществ в жидкой фазе на определенной глубине. Параллельно отдельно отстаивали глинистую суспензию и подвергнутую ультразвуковой обработке суспензию активного ила, что позволило оценить наличие или отсутствие флокулирующего действия. Эксперимент повторяли многократно (более 20 серий), используя суспензии с различной концентрацией дисперсной фазы.

Установлено, что скорость совместного осаждения взвешенных частиц глинистых суспензий и 1...3% об., САИ или кека на 17...20% выше, чем для каждой в отдельности. Скорость осаждения и степень очистки при отстаивании в течение 60 мин зависит от концентрации взвешенных веществ в глинистой суспензии и с ее увеличением уменьшается. При концентрации глинистой суспензии 500 г/дм<sup>3</sup> она составляет 10...15%, а для концентрации 1000 г/дм<sup>3</sup> – 0...3%. В качестве примера на рисунке 3 представлены графики зависимости эффективности осаждения САИ (6,2 г/дм<sup>3</sup>, гидродинамический излучатель, расход энергии 610 Дж/г) и глинистой суспензии.



1 – САИ + суспензия глины 200 мг/л; 2 – САИ; 3 – суспензия глины 200 мг/л;  
4 – САИ + суспензия глины 1000 мг/л; 5 – САИ; 6 – суспензия глины 1000 мг/л

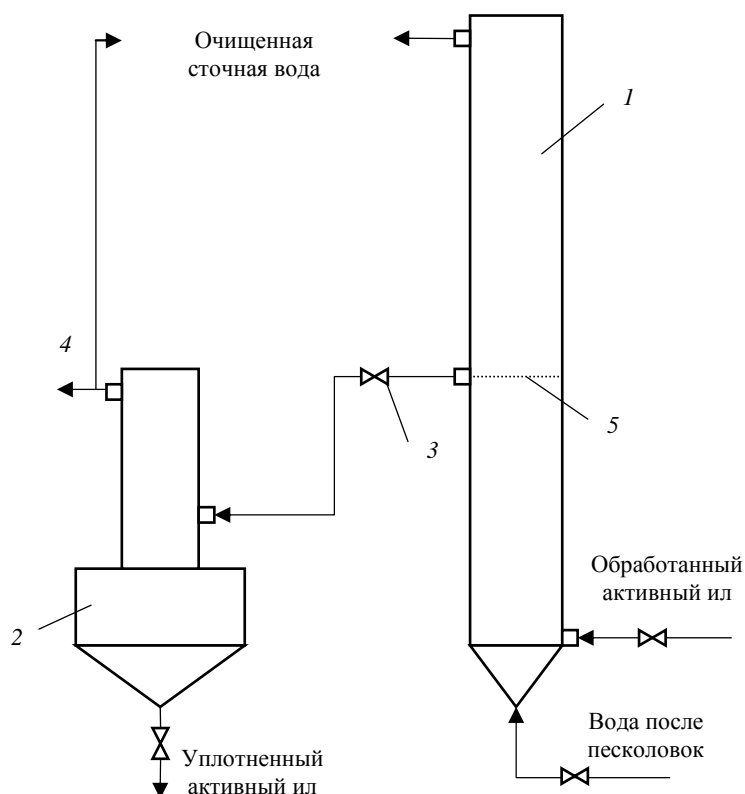
Рисунок 3. – Осаждение глинистой суспензии и САИ

Использование фугата обработанной ультразвуком иловой суспензии для осаждения глинистых суспензий не дало ожидаемого результата. Небольшой положительный эффект (увеличение степени очистки на 7%) наблюдался лишь для суспензии 1000 мг/дм<sup>3</sup>. При использовании фугата АИ эффективность осаждения взвешенных веществ несколько повышается только при высоких концентрациях суспензии. Так, при совместном отстаивании фугата и суспензий концентрацией 200 и 1000 мг/дм<sup>3</sup> эффективность очистки уменьшается соответственно на 20 и 10% в сравнении с эффективностью свободного осаждения суспензий, а эффективность осаждения суспензии 1000 мг/дм<sup>3</sup> увеличивается на 7% в сравнении с эффективностью осаждения исходной суспензии.

Эффективность использования обработанной ультразвуком САИ подтверждена на сточных водах Минской очистной станции (концентрация взвешенных веществ 288 мг/дм<sup>3</sup>) и очистных сооружений УП «Витебскводоканал» (концентрация взвешенных веществ 152 мг/дм<sup>3</sup>).

Учитывая, что при ультразвуковой обработке иловой суспензии наблюдается переход внеклеточных полимеров в жидкую фазу, а в сточных водах, поступающих на очистные сооружения канализации, концентрации взвешенных веществ недостаточно для достижения режима стесненного осаждения, характеризующегося большей эффективностью, в условиях очистных сооружений УП «Витебскводоканал» проведены исследования очистки во взвешенном слое осадка с использованием обработанной ультразвуком иловой суспензии.

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 4.



1 – осветлитель (высота 300, диаметр 10 см); 2 – илоуплотнитель (диаметр 19, высота 120 см);  
3 – кран; 4 – отбор проб осветленной воды; 5 – верхний уровень взвешенного слоя активного ила

Рисунок 4. – Схема установки очистки сточных вод во взвешенном слое осадка

В исследованиях использовали сточную воду, отобранную из распределительной камеры песколовки, и суспензию активного ила, отобранную после вторичных отстойников УП «Витебскводоканал». Обработанную суспензию активного ила и сточную воду подавали в осветлитель насосами с расходами 2,4...2,6 и 22,3...22,8 дм<sup>3</sup>/ч соответственно. Высота взвешенного слоя осадка составляла 80...120 см и регулировалась с помощью крана 3 путем отведения избытка осадка в илоуплотнитель. Отбор проб осветленной сточной воды проводили после достижения заданной высоты взвешенного слоя. Установлено, что при осветлении сточных вод во взвешенном слое осадка с расходом САИ в диапазоне 8...12% об. к сточной воде, поступающей на механическую очистку, степень очистки по взвешенным веществам увеличивается до 80...92% с 60% без использования САИ.

**Выводы.** Результаты исследований свидетельствуют о том, что ультразвуковая обработка при энергозатратах в диапазоне 700...1500 Дж/г для пьезоэлектрического и гидродинамического излучателей позволяет усилить флокулирующие свойства иловых суспензий, использование которых позволяет интенсифицировать процесс очистки сточных вод от взвешенных веществ.

Обработку ультразвуком малой интенсивности целесообразно использовать на очистных сооружениях канализации для увеличения степени очистки от взвешенных веществ и производительности оборудования механической очистки сточных вод.

Показано, что ультразвуковая обработка при расходе энергии до 1500 Дж/г твердой фазы способствует увеличению флокулирующих свойств иловой суспензии. Расход обработанных ультразвуком иловых суспензий, обеспечивающий повышение степени очистки, для гравитационного осаждения составляет 1...3% об., для осветления во взвешенном слое – 8...12% об.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Wang, Fen Mechanisms and kinetics models for ultrasonic waste activated sludge disintegration / Fen Wang, Yong Wang, Min Ji // Journal of Hazardous Materials. – 2005. – Vol. 123, № 8. – P. 145–150.

2. Ultrasonic pretreatment of sludge : A review / Sridhar Pilli [et al.] // Ultrasonics Sonochemistry. – 2011. – Vol. 18, № 1. – P. 1–18.
3. Clark, P.B. Ultrasonic sludge pretreatment for enhanced sludge digestion / P.B. Clark // Water and Environ. Manag. – 2000. – Vol. 14, № 1. – P. 66–71.
4. Zielewicz-Madej, E. Zastosowanie dezintegracji ultradźwiękowej do intensyfikowania produkcji lotnych kwasów tłuszczowych z osadu wtórnego / E. Zielewicz-Madej // Inz. i ochr. srod. – 2001. – Vol. 4, № 2. – S. 231.
5. Seungmin, Na Physiochemical properties of digested sewage sludge with ultrasonic treatment / Na Seungmin, Young-Uk Kim, Jeehyeong Khim // Ultrasonics Sonochemistry. – 2007. – Vol 14, № 3. – P.281–285.
6. Xin Feng, Jinchuan Deng, Hengyi Lei, Tao Ba, Qingjuan Fan, Zhaoxu Li. Dewaterability of waste activated sludge with ultrasound conditioning // Bioresource Technology. – 2009. – Vol. 100, № 3. – P. 1074–1081.
7. Effect of ultrasound pretreatment in mesophilic and thermophilic anaerobic digestion with emphasis on naphthalene and pyrene removal / T.B. El-Hadj [et al.] // Water Res. – 2007. – Vol. 41, № 1. – P. 87–94.
8. Chemical and structural (2D) linkage between bacteria within activated sludge flocs / F. Jorand [et al.] // Water Res. – 1995. – Vol. 29, № 7. – P. 1639–1647.
9. Ultrasonic treatment of an aerobic activated sludge in a batch reactor / E. Gonze [et al.] // Chem. Eng. Process. – 2003. – Vol. 42, № 12. – P. 965–975
10. Forster, C.F. Flocculating agents of microbial origin / C.F. Forster, N.J.B. Knight, D.A.J. Wase // Adv. Biotechnol. Prog. – 1985. – Vol. 2, № 1. – P. 211–240.
11. Vallom, J.K. Lysis as a factor in sludge flocculation / J.K. Vallom, A.J. McLoughlin // Water Res. – 1984. – Vol. 18, № 12. – P. 1523–1528.
12. Dewil, R. Ultrasonic treatment of waste activated sludge / R. Dewil, J. Baeyens, R. Goutvriend // Environ. Progress. – 2006. – Vol. 25, № 2. – P. 121–128.
13. Physical and chemical characteristics of waste activated sludge treated ultrasonically / X. Feng [et al.] // Chem. Eng. Process. – 2009. – Vol. 48, № 1. – P. 187–194.
14. Ultrasound waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization / A. Tiehm [et al.] // Water Res. – 2001. – Vol. 35, № 8. – P. 2003–2009.
15. Способ определения распространения границы смачивания и краевого угла внутри капилляров пористого материала, устройство и автоматизированная система измерения, его реализующие : пат. ВУ 8807 / И.О. Оробей [и др.]. – Оpubл. : 30.03.2005.
16. – Фролов, Ю.Г. Лабораторные работы и задачи по коллоидной химии. – М. : Химия, 1986. – 216 с.

Поступила 28.07.2017

## INFLUENCE OF ULTRASONIC TREATMENT ON SEDIMENTATION AND WETHEATING PROPERTIES OF SUSPENSIONS OF ACTIVE SLUDGE

**I. HOLOVNEV, V. MARTSUL**

*The results of investigations of the influence of ultrasonic treatment on the sedimentation and water-release properties of suspensions of active sludge are presented. The object of the study was a slurry of activated sludge, as well as liquid and solid phases (cake and fugate) of an ultrasonically treated suspension with ultrasonic installations with piezoelectric and hydrodynamic radiators. The efficiency of the ultrasonic treatment was evaluated by the change in the disperse composition and the time of capillary absorption of the slurry, as well as the sedimentation characteristics of the clay suspensions.*

**Keywords:** suspension of the activated sludge, sedimentation characteristics, water yield properties, ultrasonic devices, the efficiency of ultrasonic treatment.